

# 중 고속 자기부상열차용 선형 유도전동기의 단부효과를 고려한 간접벡터 제어 알고리즘

서현욱, 김영기, 최성호, 김주범, 이인석  
브이씨텍

## IFOC of Linear Induction Motor Considering The End Effect for Medium High Speed Maglev Vehicle

Hyunuk.Seo, Youngki Kim, Seongho Choi, Jubeom Kim, Inseok Lee  
VCTech

### ABSTRACT

본 논문에서는 중 고속 자기부상열차용 선형 유도전동기에서 나타나는 단부효과를 고려하여 중 고속 운전을 할 수 있는 제어 알고리즘을 제안한다. 선형 유도전동기에서 나타나는 단부효과를 수식적으로 분석하여 선형 유도전동기 시뮬레이션 모델을 구성하였으며, 단부효과의 영향을 보상하여 제어를 함으로서 선형 유도전동기 적합한 제어 알고리즘을 구성하여 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

### 1. 서 론

최근 교통시장이 활발해지면서 도시의 과밀화와 교통망 포화에 따른 GTX(Great Train Express) 광역 도시간 운행 수단에 대한 수요가 증가하고 있다. GTX에 활용할 철차는 기존의 회전형 전동기를 사용하는 고속철차를 적용하기에는 도심지 운행 및 많은 지하 구간 운전을 충족시키기 위한 저 소음, 높은 가속 운전 특성이 요구 된다.

회전형 기계를 직선운동으로 변환하기 위해서 반송장치에 이용하게 될 경우, 기기의 축을 기준으로 위치를 결정하면서 발생동력을 반송 장치에 전달하게 된다. 이때 직선운동으로 변화하는 과정에서 기계장치가 연결되어야 하며 이 부분에서 기계적 손실 및 큰 소음이 발생하게 된다. 반면 선형유도 전동기는 구조가 단순하고, 유지보수가 용이하며, 동력 변환장치가 없이 직선 추진력을 얻을 수 있어 운행에 소음이 적고 회전형 기기보다 운행 특성이 더 좋은 등 특성을 가질 수 있다. 자기부상열차와 같은 높은 등 특성이 요구되는 부하의 추진장치를 선형 유도전동기로 구축하기 위해서는 기존에 사용하던 V/F제어 방식이 아닌 직접 토크와 자속을 독립적으로 제어할 수 있는 벡터제어를 적용하는 것이 더 적합하다. 하지만 벡터 제어는 제어 대상의 모델이 따라서 그 성능이 좌우되기 때문에 정확한 선형유도 전동기의 모델이 필요로 하다.

본 논문에서는 중 고속 자기부상열차에 사용 가능한 선형유도 전동기의 간접벡터 기법을 구성하기 위하여 선형 유도전동기의 단부효과가 고려된 등가회로를 Ducan의 등가회로 기법에 따라서 구성하였다. 또한 선형 유도전동기 적합한 등가회로를 기반으로 단부효과를 고려한 간접벡터 제어를 구성하여 선형 유도전동기의 등가회로를 검증하였다.

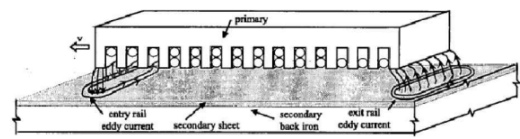


그림 1 선형유도 전동기 모형  
Fig. 1 Linear induction motor model

### 2. 단부효과를 고려한 LIM IFOC제어

#### 2.1 단부효과를 고려한 정상

그림 1은 선형 유도전동기의 모형이다. 선형 유도전동기는 회전형 유도전동기와 다르게 2차측에 알루미늄 플레이트가 존재한다. 선형 유도전동기의 단부효과는 1차측의 교류 자속이 선로를 따라 진행하면서 2차측의 알루미늄 판을 지나가게 되고 2차측 알루미늄 판에서 와전류가 형성되어 1차측에서 형성하는 자속을 감소시키는 문제이다. 또한 진행방향의 반대 측에서는 1 차측의 움직임으로 판에 채교하고 있던 자속이 감소하게 되고 이는 감소되는 자속을 다시 복원시키려는 방향으로 또 다른 와전류를 알루미늄 판에 발생시킨다. 결과적으로 후면에서는 이동자를 잡아끄는 힘으로 작용하여 이동자의 추력을 감소시키는 요인으로 작용한다. LIM에서는 진행 방향의 전면 및 후면에서 발생하는 와전류로 인한 LIM의 공극자속 감소 및 추력감소효과를 단부효과 라고 하며 LIM은 상기의 와전류로 인하여 회전형 기기에 비하여 매우 큰 철손이 발생한다. 단부효과는 속도가 높음에 따라서 더 크게 발생하며 그 영향은 기존에 연구에서 식 (1)의 Q라는 요소를 가지고 정의 하였다.<sup>[1]</sup>

$$Q = \frac{\tau_m R_r}{(L_m + L_{pr})v} \quad (1)$$

여기서 Q는 단부효과의 정도를 나타내는 변수이며  $\tau_m$ 은 모터의 폴피치 이동자의 유효길이를 의미하며  $R_r$ 은 2차측 저항 값이며  $L_m$ 은 상호인덕턴스 이며  $L_{pr}$  2차측 누설 인덕턴스  $v$ 는 이동자의 속도를 의미한다. Q는 자체로는 단위가 없는 값이지만, 이동자가 유효길이  $\tau_m$ 을 이동하는데 필요한 시간과 동일한 의미를 갖는다. 따라서 속도가 0에서는 Q가 무한대가 되어 회전기와 동일한 형상을 유지하며 단부효과가 나타나지

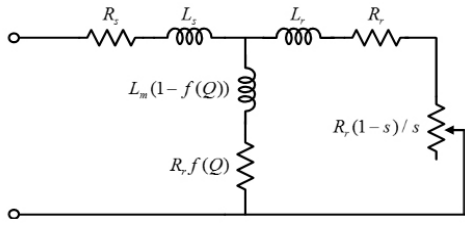


그림 2 선형 유도 전동기의 등가회로  
Fig. 2 Equivalent circuit of linear induction motor

않지만 속도가 증가할수록 Q가 감소하여 유효 자속을 감소시키는 역할을 한다. 이렇게 만들어진 Q값을 기반으로 Duncan의 선형 유도 전동기의 등가회로를 구성하면 자화 인덕턴스가 수식 (2)와 같이 변경 된다. 또한 단부효과로 인한 와류손의 손실을 추가적으로 나타내기 위하여 수식 (3)과 같은 저항성분을 추가 한다. Duncan의 등가회로를 구성하는 유도과정에서 발생한 F(Q)의 경우 수식 (4)에 나타내었다. 그림 2는 단부효과를 Q를 고려한 선형 유도전동기의 등가회로이다.

$$\widehat{L}_m = L_m (1 - f(Q)) \quad (2)$$

$$\widehat{R}_r = R_r f(Q) \quad (3)$$

$$f(Q) = \frac{1 - e^{-Q}}{Q} \quad (4)$$

## 2.2 선형 유도전동기의 간접벡터제어

그림 3은 선형유도전동기의 단부효과를 고려한 선형 유도전동기의 간접벡터 제어도의 블록다이어그램이다. IFOC는 일반적인 회전에서 사용하는 회전자 자속기준 간접벡터 제어를 사용하였으며 간접벡터 제어에 사용되는 제어기에 속도에 따른 단부효과를 고려하여 반영하였다.

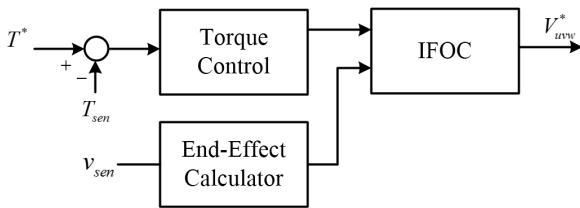


그림 3 선형 유도전동기를 위한 IFOC 제어도  
Fig. 3 IFOC block diagram for linear induction motor

시뮬레이션은 MATLAB의 시뮬링크를 통하여 선형유도전동기의 등가 모델을 구성하였으며 제어기는 PSIM의 C구현 기능을 사용하여 구성하였다. 선형 유도전동기 모델은 GTX에 적용 할 때 2P3S구성으로 표 1을 통하여 정리하였다. 그림 4는 시뮬레이션 결과이다. 0.4초 까지 속도 90km/h 의 속도를 구성 후 제어기의 성능 검증을 위하여 토크를 0.5초부터 부하 천천히 증가시켜 선형 유도전동기의 등가회로 및 단부효과를 고려한 IFOC제어기를 검증 하였다.

표 1 선형 유도전동기의 사양  
Table 1 Spec of linear induction motor

정격 전력	150kW
정격 상전압	240V
정격 주파수	60Hz
극수	12극
정격 RPM	600 RPM
정격 LIM RPM	157 RPM
정격 속도	90 km/h
최대 속도	200 km/h

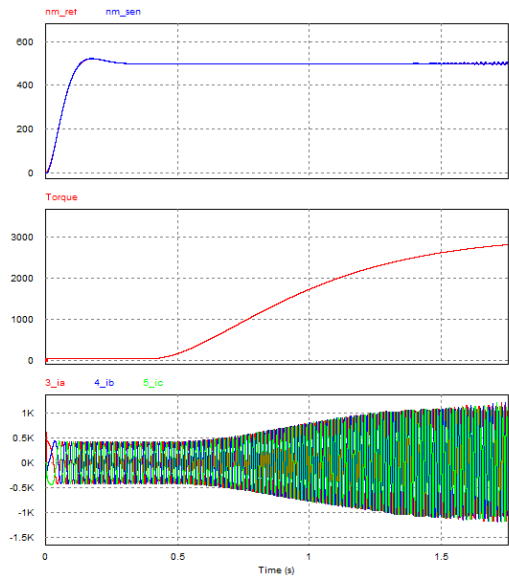


그림 4 선형 유도 전동기 IFOC 시뮬레이션  
Fig. 4 IFOC simulation results for linear induction motor

## 3. 결론

본 논문에서는 회전형 유도전동기와 다르게 선형 유도 전동기에서만 발생하는 End-Effect에 대하여 정리하였다. 또한 Duncan이 제안한 선형 유도전동기의 등가회로로 나타내었으며, 간접벡터 제어에 속도에 따른 영향을 반영하여 MATLAB & PSIM으로 선형 유도전동기의 모델을 구성 및 제어 알고리즘을 구성하여 시뮬레이션을 통하여 등가회로 및 제어 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 본 논문의 결과는 철차분야 뿐만 아니라 선형 유도전동기를 사용하는 다른 분야에도 적용이 가능할 것으로 보인다.

이 논문은 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원 (14RTRP-A069839-02)에 의해 수행 되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] J. Duncan and C. Eng, "Linear induction motor-equivalent-circuit model" Vol. 130, No. 1, 1983, January, pp. 51-57,